

О повышении точности регули- рования систем вентиляции за счёт применения искусственных нейронных сетей*

Рецензия эксперта на статью получена
30.06.2023 [The expert review of the article
was received on June 30, 2023]

Оптимизация алгоритма работы системы автоматизации тепловых пунктов после проведения оптимизации

Регулирование перепада давления на вводе сетевой воды в тепловой пункт осуществляется в зависимости от разности значений показаний датчиков давления. Регулирование температуры в системе ГВС осуществляется в зависимости от показаний датчика температуры путём воздействия на исполнительные механизмы клапана. Схема подключения — циркуляционно-повысительная. При регулировании температуры теплоносителя после водоподогревателя отопления осуществляется в зависимости от показаний датчика температуры наружного воздуха в соответствии с заданным температурным графиком путём воздействия на исполнительный механизм клапана. Поддержание заданного давления (65 м водн. ст.) в системах, например, в ХВС первой зоны осуществляется путём изменения частоты вращения рабочего насоса при помощи существующего преобразователя частоты в зависимости от показаний датчиков, установленных на трубопроводах ХВС и обратном ГВС второй зоны.

В каждой системе предусматривается защита от «сухого хода» при уменьшении давления не менее 6 м водн. ст. по показанию датчика. Подобное управление достигается путём применения современных измерительных приборов.

Выполнение тонкой подстройки режимов ИТП под особенности объекта, как правило, выполняется вручную. Перенастройка выполняется редко и тоже вручную, что свидетельствует о невысокой

точности процесса. Повысить эффективность процесса тонкой настройки можно за счёт применения программного обеспечения с искусственными нейронными сетями (ИНС).

Применение ИНС требует предварительного сбора и анализа существенно большего объёма данных о тепловом профиле объекта. Накопление Big Data осуществляется за счёт установки дополнительного числа измерителей с повышенным классом точности. Подобную модернизацию необходимо проверить на предмет изменения результирующей точности измерений.

Оценка погрешности измерений в исходном состоянии и после проведения оптимизации АСУ ИТП

В исходном состоянии автоматизированной системы управления (АСУ) ИТП контроль и управление технологическим процессом проводилось по 20 параметрам давления, расхода и температуры. После проведения оптимизации контроль и управление технологическим процессом проводится по 26 параметрам, спецификация которых приведена в табл. 1.

Оценка погрешности выполняется в соответствии с документом [1]. Суммарная погрешность измерителей в исходном состоянии АСУ теплового пункта составляла 35,25%.

Погрешность измерений после проведения оптимизации значительно снизилась по всем подсистемам. Например, после проведения оптимизации погрешность измерения температуры в подающем трубопроводе ГВС Т7 снизилась с 4,0 до 0,75 °С. Комплектный шкаф автомати-

УДК 621.1.016. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.05).

О повышении точности регулирования систем вентиляции за счёт применения искусственных нейронных сетей

С. В. Гужов, к.т.н., доцент, [Московский энергетический институт \(НИУ «МЭИ»\);](#)
А. А. Арбатский, к.т.н., генеральный директор НИИ «Инженерных климатических систем и электроники»; **Д. В. Тороп**, студент, [НИУ «МЭИ»](#)

Система вентиляции некоторых офисных и торгово-развлекательных центров, а также типовых зданий школ зачастую обеспечивает и отопление объекта. К индивидуальным тепловым пунктам (ИТП) таких зданий предъявляются дополнительные требования, касающиеся работы системы автоматики для соблюдения температуры подготавливаемого воздуха. Распространённые сейчас схемы ИТП не предоставляют возможности качественно сформировать тепловой профиль здания. В статье показана возможность дополнения существующего ИТП набором современных измерителей, позволяющих при одновременном повышении точности измерений выполнить обучение искусственной нейронной сети с последующей настройкой ПИД-регулятора. Приведена оптимальная по достигаемой точности структура искусственной нейронной сети (ИНС). На примере типового здания VI-49 школы, расположенной в городе Москве, показано, что эффект от уточнённой настройки ПИД-регулятора ИТП составляет 6–9%. Достигаемый расчётный эффект свыше 100 тыс. руб. в год.

Ключевые слова: общеобменная вентиляция, тепловой профиль здания, Big Data, индивидуальный тепловой пункт, погрешность, нейросетевая модель, ПИД-регулятор.

UDC 621.1.016. The number of scientific specialty: 2.1.3 (05.23.05).

On improving the accuracy of ventilation systems regulation through the use of artificial neural networks

S. V. Guzhov, PhD, Associate Professor, [National Research University "Moscow Power Engineering Institute" \(NRU "MPEI"\);](#) **A. A. Arbatsky**, PhD, general director of the "Engineering Climate Systems and Electronics" Research Institute; **D. V. Torop**, student, [NRU "MPEI"](#)

The ventilation system of some office and shopping and entertainment centers, as well as typical school buildings, often provides heating for the facility. Additional requirements are imposed on the individual heating points (IHP) of such buildings regarding the operation of the automation system to maintain the temperature of the prepared air. The current IHP schemes do not provide an opportunity to qualitatively form the thermal profile of a building. The article shows the possibility of supplementing the existing IHP with a set of modern meters that allow, while increasing the accuracy of measurements, to train an artificial neural network with subsequent adjustment of the PID controller. The structure of an artificial neural network (ANN), optimal in terms of achieved accuracy, is given. On the example of a typical building No. VI-49 of a school located in the city of Moscow, it is shown, that the effect of the refined setting of the PID controller, etc. is 6–9%. The estimated effect achieved is over 100 thousand rubles per year.

Key words: general ventilation, building thermal profile, bigdata, individual heating point, error, neural network model, PID controller.

* Работа выполнена в рамках проекта «Разработка нейросетевого программного обеспечения по прогнозированию спроса на тепловую энергию объектами массового строительства города Москвы» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022–2024 гг.

Оценка погрешности измерений «до» и «после» проведения оптимизации АСУ ИТП табл. 1

№	Измеряемый параметр	До, ед./Δ, %	После, ед./Δ, %
1	Шкаф комплектный автоматизации	– / –	1 / 0,15
2	Пост управления	5 / –	5 / –
3	Давление воды в подающем трубопроводе теплосети (т/с)	1 / 1,5	1 / 0,5
4	Давление воды в подающем трубопроводе т/с после клапана т/с	1 / 1,5	1 / 0,5
5	Давление воды в обратном трубопроводе т/с	1 / 1,5	1 / 0,5
6	Давление воды в обратном трубопроводе т/с перед клапаном т/с	1 / 1,5	1 / 0,5
7	Давление воды в подающем трубопроводе ГВС после ВПГ	1 / 1,5	1 / 0,5
8	Давление воды в обратном трубопроводе ГВС	1 / 1,5	1 / 0,5
9	Давление воды в подающем трубопроводе ЦО	1 / 1,5	1 / 0,5
10	Давление воды в обратном трубопроводе ЦО	1 / 1,5	1 / 0,5
11	Давление воды трубопровода ХВС	1 / 1,5	1 / 0,5
12	Давление воды в водопроводе ГВС	1 / 1,5	1 / 0,5
13	Минимальное давление воды в водопроводе ГВС	– / –	1 / 0,25
14	Перепад давления на насосах ГВС	– / –	1 / 0,25
15	Перепад давления на насосах ХВС	– / –	3 / 0,25
16	Перепад давления на насосах НО	– / –	2 / 0,25
17	Температура воды в подающем трубопроводе т/с	1 / 2,5	– / –
18	Температура воды в обратном трубопроводе т/с	1 / 2,5	– / –
19	Расход воды в подающем трубопроводе т/с	1 / 2	1 / 2
	Расход воды в обратном трубопроводе т/с	1 / 2	1 / 2
	Температура воды в подающем трубопроводе т/с	1 / 0,25	1 / 0,25
	Температура воды в обратном трубопроводе т/с	1 / 0,25	1 / 0,25
20	Температура воды в подающем трубопроводе ГВС после ВПГ	1 / 0,25	1 / 0,25
21	Температура воды в подающем трубопроводе ГВС после ВПГ	1 / 2,5	– / –
22	Температура воды в обратном трубопроводе ГВС	1 / 2,5	1 / 0,25
23	Температура наружного воздуха	1 / 0,25	1 / 0,25
24	Температура воды в подающем трубопроводе ЦО после ВПО	1 / 0,25	1 / 0,25
25	Температура воды в подающем трубопроводе ЦО после ВПО	1 / 2,5	– / –
26	Температура воды в обратном трубопроводе ЦО	1 / 2,5	1 / 0,25

зации (ШКА) на базе многофункционального контроллера МФК-1500, предел основной погрешности $\pm 0,15\%$.

Основная приведённая погрешность ТПУ-205 $\Delta = \pm 0,25\%$, дополнительная не должна превышать $0,5\%$ от основной:

$$\gamma_{ТПУ} = 0,25 + 0,5 \times 0,25 = 0,375\%.$$

Основная приведённая погрешность ШКА $\Delta = \pm 0,15\%$, дополнительная приведённая погрешность не должна превышать $0,7\%$ от основной:

$$\gamma_{ШКА} = 0,15 + 0,7 \times 0,15 = 0,255\%.$$

Тогда суммарная погрешность:

$$\gamma_{\text{сум}} = 1,1(\gamma_{ТПУ}^2 + \gamma_{ШКА}^2)^{0,5} = 1,1 \times (0,375^2 + 0,255^2)^{0,5} = 0,499\%.$$

Для диапазона D^* измеряемых температур от 0°C до $+150^\circ\text{C}$ суммарная погрешность составляет:

$$\Delta = D^* \gamma_{\text{сум}} / 100\% = (0^\circ\text{C} + 150^\circ\text{C}) \times 0,499\% / 100\% = 0,75^\circ\text{C}.$$

Расчёт произведён для измеряемой температуры $t = 60 \pm 0,75^\circ\text{C}$. Основной вклад в снижение погрешности в оптимизированной АСУ внесло применение термопреобразователя ТПУ-205 с пределом допускаемой основной приведённой погрешности $\Delta = \pm 0,25\%$ вместо биме-

таллического термометра типа БТ с классом точности 2,5. Суммарная погрешность после оптимизации АСУ теплового пункта составляет $11,75\%$.

Повышение точности регулирования систем вентиляции посредством применения ИНС для настройки ПИД-регуляторов ИТП

Использование уточнённых методов прогнозирования теплопотребления для зданий типовых проектов позволит существенно точнее обосновать целесообразность внедрения энергосберегающих технологий с целью увеличения их экологической эффективности и снижения вклада в углеродный след города Москвы.

Поскольку использование дополнительных измерителей не приводит к увеличению погрешности и не влияет на точность настройки, то становится возможным применить искусственные нейронные сети для настройки ПИД-регуляторов ИТП.

Установлено, что наиболее оптимальными для модели нейронной сети, применяемой для решения поставленной задачи,

являются следующие параметры: количество эпох обучения — 100 ед.; три слоя по 256/64/256 нейронов, соответственно; функция потерь — МАЕ; функция активации — гиперболический тангенс.

Данная модель показала наименьшие значения функций потерь среди всех остальных экспериментов: средняя абсолютная ошибка $\text{MAE} = 10,11\%$, среднеквадратичное отклонение (Root Mean Square Error) $\text{RMSE} = 19,28\%$.

Обучение ИНС и создание на её основе теплового профиля здания позволяет определить значения для настройки ПИД регулятора. Интегральная составляющая (I) регулятора учитывает сумму прошлых ошибок и использует их для коррекции текущей ошибки. Она позволяет устранить остаточную ошибку и обеспечить точность регулирования в долгосрочной перспективе. Дифференциальная составляющая (D) регулятора учитывает скорость изменения ошибки и предотвращает резкие изменения.

Применение искусственных нейронных сетей в качестве инструмента предиктивной аналитики позволяет на 6–9% повысить точность регулирования теплообеспечения объекта и пропорционально снизить углеродный след от теплопотребления зданиями типовой застройки.

Численный эксперимент, проведённый для типового здания VI-49 школы, показал, что при внедрении предиктивной аналитики в систему автоматизации теплового пункта экономия для конечного потребителя составит:

$$\Delta S_3 = C_{\text{тз}} \Delta Q_{\text{потр}} = 2685,54 \times 38,22 = 102,6 \text{ тыс. руб. в год,}$$

где $\Delta Q_{\text{потр}}$ — величина изменения количества тепла, потребляемого зданием, Гкал/год; $C_{\text{тз}}$ — тариф на тепловую энергию, поставляемую ПАО «МОЭК», руб/Гкал.

С помощью нейросетевого программного обеспечения достигается не только расчёт ожидаемого значения количества потребляемой тепловой энергии, но и температуры отпускаемого теплоносителя с ЦТП, а также коэффициенты ПИД-регулятора для повышения эффективности регулирования системы теплоснабжения. Качественно снижается ошибка, возникающая при ручном настраивании регулятора, что влечёт за собой снижение перерасхода тепловой энергии и повышение общей экономической эффективности всей системы. ●

1. РД 153-34.0-11.201-97. Методика определения обобщённых метрологических характеристик измерительных каналов ИИС и АСУ ТП по метрологическим характеристикам агрегатных средств измерений. — М.: СПО ОРГРЭС, 1999.

References — see page 78.

[On improving the accuracy of ventilation systems regulation through the use of artificial neural networks. Pp. 52–53.](#)

Sergey V. Guzhov, PhD, Associate Professor, [National Research University "Moscow Power Engineering Institute" \(NRU "MPEI"\)](#); **Andrey A. Arbatsky**, PhD, general director of the "Engineering Climate Systems and Electronics" Research Institute; **Daria V. Torop**, student,

-
1. RD 153-34.0-11.201-97 [Guideline of the Industry No. 153-34.0-11.201-97]. *Metodika opredeleniya obobshchennykh metrologicheskikh kharakteristik izmeritel'nykh kanalov IIS i ASU TP po metrologicheskim kharakteristikam agregatnykh sredstv izmerenij* [Method for determining the generalized metrological characteristics of measuring channels of information-measuring systems and automated process control systems according to the metrological characteristics of aggregate measuring instruments]. Moscow. SPO ORGR/JS ["All-Union State Trust for the Organization and Rationalization of District Power Plants and Electric Networks" (ORGRES) Commonwealth of Design Organizations]. 1999. [In Russian]